第 38 卷第 6 期
2018 年 3 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.6
Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201701150122
刘可,杜灵通,侯静,胡悦,朱玉果,宫菲.近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征.生态学报,2018,38(6):1885-1896.
Liu K, Du L T, Hou J, Hu Y, Zhu Y G, Gong F.Spatiotemporal variations of NDVI in terrestrial ecosystems in China from 1982—2012.Acta Ecologica Sinica,2018,38(6):1885-1896.

近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征

刘 可[1,2],杜灵通[1,2,*],侯 静[1,2],胡 悦[1,2],朱玉果[1,2],宫 菲[1,2]
1 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021
2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要:气候变化已明显影响到陆地植被的活动,但在不同生态系统间存在差异,研究不同陆地生态系统归一化植被指数(NDVI)的时空变化特征,不仅可揭示各生态系统植被活动对气候变化的响应规律,而且可为我国不同生态区制定应对气候变化的策略和生态文明建设提供科学依据。基于 1982—2012 年 GIMMS NDVI3g 和中国陆地生态系统类型数据,利用一元线性回归、集合经验模态分解和相关分析等方法,研究了近 30 年中国各陆地生态系统 NDVI 的时空变化特征,分析了其与气候事件的关系。结果表明,近 30 年中国植被活动显著上升,年平均归一化植被指数(ANDVI)的上升幅度为 0.0029/10a(P<0.05),年最大归一化植被指数(MNDVI)的上升幅度为 0.0076/10a(P<0.01);植被活动显著增强的区域主要是分布在东部季风区的农田和森林生态系统,显著下降的区域主要是分布于西北的荒漠生态系统和东北的森林生态系统;尽管 ANDVI 和 MNDVI 线性趋势的显著性有所差异,但农田、森林、草地和水体与湿地生态系统的 NDVI 总体呈非稳定的上升趋势,上升过程中伴随着较大波动,荒漠生态系统的 NDVI 呈下降趋势,植被退化显著;与线性趋势不同,各生态系统植被活动的残差趋势包含"上升—下降"两个阶段,并相继于 20 世纪 90 年代到 21 世纪初发生转折;上述 5 类生态系统的植被活动存在不同尺度的周期特征,年际周期波动特征(1.9—7.6a)比较显著,而年代际周期(10.7a 和 22.2a)的显著性相对较差;各生态系统的空间异质性在趋强过程中存在 2.1—7.1a的年际周期节律;海洋与大气环流的短周期脉动与各生态系统植被活动的周期性节律有着明显关联,ENSO 事件和太阳活动是推动植被活动周期性振荡的重要因素。

关键词:陆地生态系统;NDVI;集合经验模态分解;时空变化;振荡周期;残差趋势

Spatiotemporal variations of NDVI in terrestrial ecosystems in China from 1982—2012

LIU Ke[1,2], DU Lingtong[1,2,*], HOU Jing[1,2], HU Yue[1,2], ZHU Yuguo[1,2], GONG Fei[1,2]
1 *Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China Ningxia University*, *Yinchuan* 750021, *China*
2 *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education Ningxia University*, *Yinchuan* 750021, *China*

Abstract: Vegetation, an important component of terrestrial ecosystems, tells the story of the ecological response to climate change. In the context of climate change, vegetation changes have directly affected substance exchanges and energy balance of regional land-atmosphere interaction processes. Additionally, in China, the vegetation activity of varied terrestrial ecosystems has responded to global climate change in significantly different ways. As a vital remote sensing indicator, the normalized difference vegetation index (NDVI) reflects vegetation growth and coverage, and time series analysis can describe the temporal evolution and spatial variability of vegetation very well. Thus, studying the spatiotemporal variation of

基金项目:国家自然科学基金项目(41661003);宁夏自然科学基金项目(NZ16010);宁夏高等学校科研项目(NGY2016074);宁夏大学研究生创新项目(GIP2017005)
收稿日期:2017-01-15; **网络出版日期:**2017-12-19
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dult80@ nxu.edu.cn

NDVI in terrestrial ecosystems not only reveals the response of vegetation in those ecosystems to climate change, but can provide a scientific basis for action on climate change and ecological considerations in an increasingly urbanized country like China. Based on the Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) NDVI3g dataset for 1982—2012, and the macro structure data of the Chinese terrestrial ecosystem, this study utilized one-dimensional linear regression, ensemble empirical mode decomposition (EEMD), and correlation analysis to examine spatiotemporal variation in the NDVI of each terrestrial ecosystem in China. It also analyzed the relationship between NDVI and climate events over a recent 30-year period. The results show that the average normalized difference vegetation index (ANDVI) and maximum normalized difference vegetation index (MNDVI) increased (0.0029/10 a, $P<0.05$ and 0.0076/10 a, $P<0.01$, respectively) over the same period. These phenomena indicate the activity of vegetation strengthened in China. In addition, owing to its sensitivity to water-thermal factors, MNDVI can be a useful supplement for monitoring vegetation change. Furthermore, the areas with significant increases in vegetation activities were mainly the farmland and forest ecosystems in the eastern monsoon region, and the areas with significant decreases in vegetation activities were mainly the forests in Northeast China and the desert ecosystem in Northwest China. With ANDVI and MNDVI showing linear trends at different significance levels, the NDVIs of the farmland, forest, grassland, and water and wetland ecosystems showed a general upward trend with large fluctuations, while the NDVI of the desert ecosystem decreased, with obvious vegetation degradation. However, EEMD detected an inflection point among the trends in the five ecosystems that was distinct from the linear trend. This occurred in the 1990s and early 21st century when the NDVI trend shifted from increasing to decreasing. The decomposed results indicated that the NDVI of the ecosystems had oscillation characteristics on an inter-annual (1.9—7.6 years) and an inter-decadal (10.7—22.2 years) scales, with the former being statistically more prominent. The increasing spatial heterogeneity of the NDVI of different terrestrial ecosystems also showed inter-annual periods of 2.1—2.7 years, with increasing regional differences in vegetation activity. Furthermore, the short period-pulsation of the air-sea system from the El Niño-Southern Oscillation and solar activity influenced vegetation activity via climatic factors, which was evidently related to the oscillation characteristics in all ecosystems.

Key Words: terrestrial ecosystem; NDVI; ensemble empirical mode decomposition; spatiotemporal variation; oscillation period; residual trend

气候变化已影响到陆地生态系统的生物、物理和化学过程[1-2],植被作为陆地生态系统的重要组成部分,对气候变化比较敏感[3-4],气候变化引起的植被变化已直接影响到区域陆—气交互过程的物质与能量平衡[5]。因此,开展区域及全球尺度的植被变化研究对认识气候变化与陆地生态系统的相互作用有重要意义[6]。大尺度植被变化的连续观测对传统生态学研究技术提出了挑战,随着全球变化生态学的发展[7],遥感技术逐渐成为大尺度生态问题连续观测的重要手段。卫星传感器通过探测陆表的光谱反射信息来识别植被的变化,利用植被在可见光与近红外波段的反射特征构建的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI),常作为植被生长状况及覆盖度变化的最佳指示因子[8],已在不同尺度植被变化研究中广泛应用[9-10],特别是时间序列的 NDVI 能较好的反映陆表植被活动的时间演化和空间变异特征[11]。Myneni 等[12]利用 1982—1991 年的 AVHRR-NDVI 数据对全球植被活动进行了研究,提出了北半球中高纬地区植被活动增强的观点;Piao 等[13]利用 Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS)第二代 NDVI 产品研究了 1982—2006 年亚欧大陆生长季的植被活动,指出 NDVI 存在两个明显的变化阶段,1997 之前显著上升,1997 年之后 NDVI 上升趋势减缓;Park 等[14]同样利用该 GIMMS 产品研究了东亚地区的植被活动,得出 NDVI 增加趋势在 20 世纪 90 年代中期发生明显转折;杜家强[15]等利用 AVHRR 和 MODIS 两个传感器构建的连续 NDVI 数据对新疆近 30 年的植被活动展开研究,认为 NDVI 的变化趋势在 20 世纪 90 年代末存在拐点。此外,诸多学者关于不同地理单元[16-17]乃至全国范围[18-20]的植被活动研究认为,研究区的植被活动总体增强。

然而,以上研究存在几方面的问题,一是大多研究基于上一代 GIMMS NDVI[21](1982—2006)、SPOT-VGT NDVI(1998—)或 MODIS NDVI(2000—至今)等数据,往往研究时间序列较短;尽管有学者延续不同传感器的 NDVI 数据开展植被变化研究[22],但不同传感器的性能差异又增加了 NDVI 数据的不确定性。二是传统的线性分析方法对时序较短的非平稳 NDVI 序列开展变化趋势研究,会忽略非平稳数据的非线性波动特征,致使研究结论和规律存在局限性,而集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition,EEMD)因其良好的自适应性可弥补该缺陷。三是前人研究多从自然单元和行政区划的角度探讨植被活动特征,忽视了不同陆地生态系统内部的植被活动规律,而我国类型多样的陆地生态系统往往镶嵌分布,不同陆地生态系统的植被活动对气候变化的响应存在明显差异[23]。为此,本研究将利用 1981—2012 年的第三代 GIMMS NDVI 数据(GIMMS NDVI3g)和集合经验模态分解等非线性分析方法,从生态系统的视角出发,开展近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征研究,以期揭示气候变化背景下各生态系统的响应,为我国制定应对气候变化的策略和生态文明建设提供科学依据。

1　数据与方法

1.1　数据资料

1.1.1　GIMMS NDVI3g 数据

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)基于 NOAA-AVHRR 系列数据开发出的 GIMMS NDVI3g 产品是一种长时序的全球植被指数数据集[24](1981—2012 年),空间分辨率为 8km,时间分辨率是 15d。该数据集消除了大气水汽、火山爆发、太阳高度角和传感器灵敏度的变化等因素的影响[25],精度得到有效提高,良好的数据质量及连续的时间序列使其在大尺度生态过程模拟研究中得到广泛应用。本研究从 NASA 网站(http://ecocast.arc.nasa.gov/)获取了 1982—2012 年覆盖全球的 GIMMS NDVI3g 数据,运用 IDL 软件编程对遥感影像进行读取、配准、格式转换以及研究区裁剪等预处理。

1.1.2　中国陆地生态系统类型数据

中国陆地生态系统类型宏观结构数据源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)。基于遥感解译获取的 1:10 万土地利用/土地覆盖数据对各生态系统类型进行辨识、研究和重新分类,形成中国陆地生态系统类型数据集(分别为农田生态系统、森林生态系统、草地生态系统、水体与湿地生态系统、荒漠生态系统、聚落生态系统和其他生态系统)。本研究采用 2010 年的数据集,提取不同生态系统类型,因聚落生态系统和其他生态系统类型所占比例较低,同时考虑到聚落生态系统的碎小斑块很难在 8km 分辨率的 GIMMS NDVI3g 数据中反映出来,其他生态系统主要为裸土地或裸岩石质地,其 NDVI 指标无实际生态学意义,故研究中未对这两类生态系统类型进行分析。

1.1.3　其他数据

多变量厄尔尼诺-南方涛动指数(The Multivariate ENSO Index, MEI)来源于美国国家海洋与大气管理局地球系统研究实验室(http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/),集合了海平面气压、海表温度、海面气温、地面纬向风和径向风、总云量等参数,能够全面地监测和反映厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)事件[26]。太阳黑子数据采用比利时皇家天文台太阳活动数据分析中心(http://www.sidc.be/silso/datafiles)发布的月太阳黑子数序列,该数据已采用 13 个月滑动窗口平滑处理。本研究截取 1982—2012 年的时间序列,并用集合经验模态分解提取不同时间尺度的周期分量。

1.2　研究方法

1.2.1　年植被指数合成方法

中国植被类型丰富多样,同一生态系统往往兼有多个自然带的不同植被型,且部分植被型存在明显的季相特征。为更全面描述年际植被活动特征,本研究合成了年平均归一化植被指数(ANDVI)和年最大归一化植被指数(MNDVI)两种指标[27],分析 1982—2012 年中国陆地生态系统植被活动的空间变化。其中,ANDVI

反映年内植被生长的平均状态,MNDVI 反映当年最优水热组合下的植被最佳生长状态,即最佳植被长势。

$$\mathrm{ANDVI} = \frac{1}{24}\sum_{i=24}^{24} \mathrm{NDVI}_{ij} (1 \leqslant i \leqslant 24, 1982 \leqslant j \leqslant 2012) \quad (1)$$

$$\mathrm{MNDVI} = \max(\mathrm{NDVI}_{ij}) (1 \leqslant i \leqslant 24, 1982 \leqslant j \leqslant 2012) \quad (2)$$

1.2.2 回归分析

采用最小二乘法逐像元拟合 1981—2012 年间的 GIMMS NDVI3g 数据序列,求取各像元近 30 年的变化斜率。一元线性回归斜率值的正、负分别表示 NDVI 升高或降低的趋势,斜率的大小则反映了 NDVI 值上升或下降的程度,回归趋势的显著性采用 F 检验判定。将 NDVI 变化趋势和不同显著性水平($P=0.05$ 和 $P=0.01$)叠加分析,可得到极显著上升、显著上升、上升(但不显著)、下降(但不显著)、显著性下降和极显著性下降 6 种变化趋势组合。

1.2.3 集合经验模态分解

集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)[28-29]是近年来发展的一种适应于非线性、非平稳序列的信号分析方法,该法在 EMD(Empirical Mode Decomposition)的基础上,引入辅助白噪声,继承了 EMD 的自适性,有效地解决了尺度混合问题;它将原始信号中不同时间尺度的周期特征分解开,形成具有不同尺度周期的本征模态函数分量(Intrinsic Mode Function, IMF)和一个残差分量(Residual Standard Error, RSE)。其中,所添加白噪声对原始信号的影响将遵循如下统计规律[30]:

$$\sigma = \varepsilon / \sqrt{N} \text{ 或 } \ln\sigma + \frac{\varepsilon}{2}\ln N = 0 \quad (3)$$

式中,σ 为标准偏差,即输入信号与相应 IMF 分量的偏差,ε 为白噪声幅度,N 为集合样本数。

经蒙特卡罗法验证,当自由度趋于无穷,添加白噪声的序列经过分解后,IMF 的能量谱平均密度与平均周期具有如下关系:

$$\ln\bar{E}_n + \ln\bar{T}_n = 0 \quad (4)$$

式中,$\bar{E}_n$ 为 n 个 IMF 的能量谱平均密度,$\bar{T}_n$ 为相应平均周期。理论上,白噪声 IMF 分量的平均周期与谱密度在二维空间中分布在斜率为-1 的直线上,但实际偏差使得连续概率分布下白噪声能量谱密度与平均周期有如下关系:

$$\ln\bar{E}_n = \ln\bar{T}_n \pm k\sqrt{\frac{2}{df}}e^{\ln\bar{T}_n/2} \quad (5)$$

式中,$\bar{E}_n$ 为平均能量,$\bar{T}_n$ 为平均周期,df 为自由度,当 $k = 2.326$ 和 1.645 分别可以得到 99%和 95%的置信区间。分布在不同显著水平曲线之上的 IMF 分量表示通过了相应水平的显著性检验,即该 IMF 分量具有显著的物理意义。

EEMD 分解 15d 合成的 GIMMS NDVI3g 序列及标准差序列时,辅助白噪声与原始信号的标准差比率为 0.2,集合样本数为 1000,并借助白噪声的集合扰动对 IMF 分量进行显著性检验,获取不同 IMF 的信度水平。其中,IMF 分量表征从高频到低频不同时间尺度的 NDVI 周期波动特征,RSE 反映了 NDVI 时间序列的残余变化趋势。

2 结果与分析

2.1 近 30 年中国 NDVI 总体空间变化特征

1982—2012 年,中国 ANDVI 整体呈上升趋势(0.0029/10a,$P<0.05$)。从图 1 看出,全国有 59.31%的国土区域 ANDVI 呈上升趋势,其中仅 44.69%的区域超过 5%显著性水平;全国有 40.69%的国土区域 ANDVI 呈下降趋势,其中有 46.43%的区域超过 5%显著性水平。从空间上看,大兴安岭、嫩江流域上游、三江平原、长白山、长三角地区和珠三角地区的 ANDVI 显著下降,降幅达到 0.0080/10a 以上($P<0.01$),说明这些区域的年平

均植被活动在减弱;此外,西北地区的准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地、甘肃西部和内蒙古西部广大地区的 ANDVI 降幅不大,但下降趋势极为明显,这与上述地区 NDVI 本底值较低有关。华北平原、黄土高原、秦巴山区、台湾山脉、东南丘陵局部、海南岛局部和横断山区的 ANDVI 极显著上升,增幅达到 0.0080/10a 以上(P<0.01),局部地区增幅远超 0.0240/10a,说明这些地区的年平均植被活动在增强;此外,藏北高原及天山局部地区的 ANDVI 虽然增幅不高,但上升趋势极为明显。

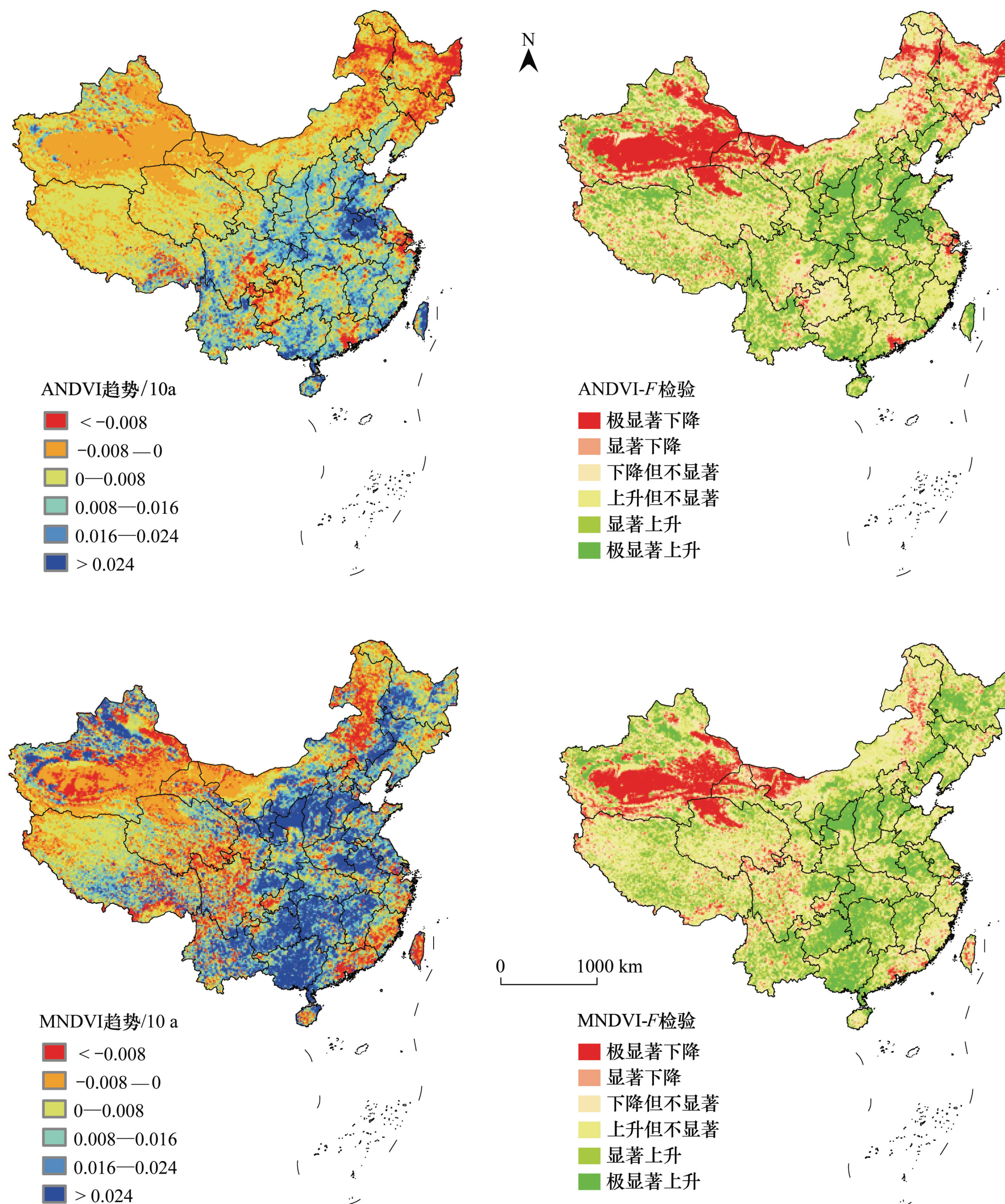


图 1　最大归一化植被指数(ANDVI)、平均归一化植被指数(MNDVI)变化趋势及显著性检验

Fig.1　Trend and significance test of ANDVI and MDNVI

近 30 年全国 MNDVI 整体也呈上升趋势,且上升幅度比 ANDVI 更强(0.0076/10a,P<0.01)。如图 1 所示,占比 65.24%的国土区域 MNDVI 呈增加趋势,其中 46.85%的区域超过 5%显著性水平;占比 34.76%的国土区域 MNDVI 呈下降趋势,其中超过 5%显著性水平的区域仅占 39.27%。从空间上看,极显著下降的区域主要分布在以荒漠生态系统为代表的内蒙古高原西部、准噶尔盆地和塔里木盆地,说明这些地区年最佳植被长

势在逐年减弱;而东北平原、华北平原、黄土高原、天山南北两侧绿洲区、大巴山脉、两广丘陵及云贵高原局部的 MNDVI 呈极显著上升趋势,增幅达到 0.0240/10a 以上(P<0.01),说明这些地区年最佳植被长势在逐年增强。

由于 MNDVI 和 ANDVI 代表的植被活动意义不同,导致两者的变化幅度差异较大,尤其在东部季风区,MNDVI 的变化幅度明显高于 ANDVI。同时,二者的变化趋势在一些区域存在差异,甚至截然相反,其中东南沿海的浙闽丘陵、台湾岛和海南岛地区的年平均植被活动在增强,但年最佳植被长势却在变差,人类活动持续增强导致森林植被破坏可能是重要原因[31];东北松嫩平原的年平均植被活动在减弱,这与东北地区农田 NDVI 下降趋势一致,但年最佳植被长势却在变好,这种分异可能是暖干化趋势下松嫩平原农田生态系统的种植结构和作物熟制变化引起的。结合 ANDVI 和 MNDVI 来看,全国植被活动显著增强的区域主要是分布在东部季风区的农田和森林生态系统,而西北地区的荒漠生态系统和东北森林区的植被活动则显著减弱。

2.2 不同陆地生态系统的 NDVI 线性变化趋势分析

中国各生态系统面积占比由高到低依次是草地、森林、农田、荒漠和水体与湿地生态系统;ANDVI 和 MNDVI 最高的是森林生态系统,分别为 0.5297 和 0.8437,荒漠生态系统最低,分别为 0.0789 和 0.1543。线性趋势(表 1)表明,除荒漠生态系统外,各生态系统的植被活动主要表现出上升趋势。农田生态系统的植被活动显著增强,ANDVI 的增幅为 0.0061/10a(P<0.01),MNDVI 达到 0.0162/10a(P<0.05),这与模型模拟的中国农业植被净初级生产力增加趋势一致[32],近 30 年中国农业种植结构调整、化肥用量增加、大气 CO_2浓度升高和气候变暖[33]。森林生态系统的 ANDVI、MNDVI 均呈不同幅度的上升趋势,但 ANDVI 表现出了较强的空间差异,东北地区森林生态系统的 ANDVI 显著下降,而南方亚热带森林生态系统的 ANDVI 则显著上升,这与森林生态系统的碳源/汇空间分布格局较为一致[34];MNDVI 极显著上升,年最好植被长势显著增强可能与气候变化有关,气温和大气 CO_2浓度的升高促进了森林植被年内最茂盛时期的长势。草地生态系统的 ANDVI 显著上升(0.0022/10a,P<0.05),MNDVI 极显著上升(0.0067/10a,P<0.01),说明我国草地地上生物量显著增加,这与沈海花等[35]的研究结果一致,尽管草地生物量在近 30 年的变化趋势存在两个拐点,但总体依然呈增加趋势。水体与湿地生态系统的 NDVI 值是二者的混合信息,NDVI 变化主要源于湿地植被变化,由于近 30 年我国湿地大面积萎缩[36],特别是水体面积的萎缩和湿地植物由水生向陆生的演替,均会造成该生态系统植被盖度和生物量的增加,导致 NDVI 升高。荒漠生态系统与前 4 类生态系统截然相反,ANDVI 和 MNDVI 都处于下降趋势,这与中国西北日益严重的荒漠化现状比较吻合[37]。

表 1 各陆地生态系统近 30 年 ANDVI、MNDVI 基本特征及变化趋势

Table 1 Basic statistics of ANDVI and MNDVI in different terrestrial ecosystems and their trends in recent 30 years

生态系统类型 Types of ecosystem	面积比例 Area proportion/%	平均归一化植被指数(ANDVI)					最大归一化植被指数(MNDVI)				
		均值 Average	方差 Variance	变化幅度 Amplitude of variation/(/10a)	趋势 Trends	显著性 Significant	均值 Average	方差 Variance	变化幅度 Amplitude of variation/(/10a)	趋势 Trends	显著性 Significant
农田 Farmland	18.81	0.4177	0.0163	0.0061	上升	**	0.7473	0.0188	0.0162	上升	
森林 Forest	23.64	0.5297	0.0168	0.0053	上升		0.8437	0.0143	0.0086	上升	**
草地 Grassland	31.56	0.2437	0.0264	0.0022	上升	*	0.4703	0.0741	0.0067	上升	**
水体与湿地 Water and wetland	3.77	0.2731	0.0281	0.0010	上升		0.5315	0.0861	0.0096	上升	**
荒漠 Desert	13.5	0.0789	0.0043	−0.0002	下降	**	0.1543	0.0231	−0.0006	下降	

* 为趋势通过 5%显著性检验,** 为趋势通过 1%显著性检验

图 2 表明,农田、森林和草地生态系统的 ANDVI 均以上升为主,农田生态系统上升像元比例达 70.69%,森林和草地生态系统分别为 68.69%和 63.49%。然而,上升像元中,农田、森林和草地生态系统分别仅有 39.86%、27.31%和 27.19%的像元通过了 5%显著性检验,可见,各生态系统 ANDVI 近 30 年的上升态势并非稳

定的线性趋势,而是在上升过程中伴随着较大的波动。近 30 年,荒漠生态系统有 73.61%的像元呈下降趋势,其中有 54.47%的像元通过了 5%显著性检验,荒漠生态系统的植被存在明显的退化过程。水体与湿地生态系统的上升与下降像元比例几乎相当。各生态系统 MNDVI 近 30 年的趋势分析结果基本与 ANDVI 的结果一致,即农田、森林和草地生态系统的植被呈波动上升态势,且显著性更强,荒漠生态系统呈现较明显的退化趋势,区别在于水体与湿地生态系统的 MNDVI 有 64.29%的像元表现为上升趋势。

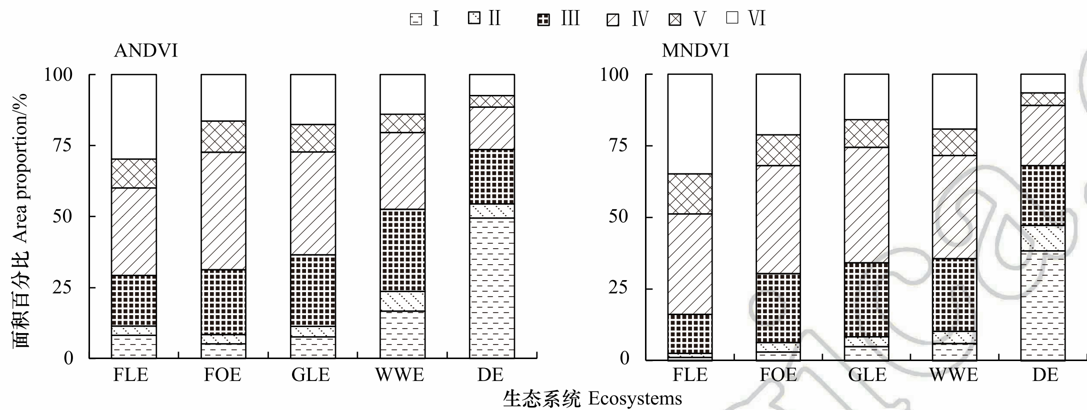


图 2　各生态系统 ANDVI 和 MNDVI 不同变化趋势的面积比例

Fig.2　Area proportion of different trends on ANDVI and MNDVI in different terrestrial ecosystems

FLE, 农田生态系统 farmland ecosystem; FOE, 森林生态系统 forest ecosystem; GLE, 草地生态系统 grassland ecosystem; WWE, 水体与湿地生态系统 water and wetland ecosystem; DE, 荒漠生态系统 desert ecosystem. Ⅰ:极显著下降, Ⅱ:显著下降, Ⅲ:下降但不显著, Ⅳ:上升但不显著, Ⅴ:显著上升, Ⅵ:极显著上升

2.3　不同陆地生态系统的 NDVI 波动特征及残余趋势

对近 30 年中国各陆地生态系统的 NDVI 时间序列进行集合经验模态分解,均可得到 8 个本征模态函数分量(IMF)及 1 个残差分量(RSE),高频分量(IMF1—IMF3/4)主要为模型添加的白噪声和植被年内季节性生长波动信息,低频分量(IMF4/5—IMF8)为年际、年代际的植被波动周期(表 2)。同时,利用白噪声的集合扰动,检验不同波动周期 IMF 分量的物理意义。

表 2　1982—2012 年不同陆地生态系统 NDVI 序列各分量的平均周期

Table 2　Mean period of each intrinsic mode function of NDVI in different terrestrial ecosystems during 1982—2012

本征模态函数 Intrinsic mode function	生态系统类型 Types of ecosystem				
	农田 Farmland	森林 Forest	草地 Grassland	水体与湿地 Water and wetland	荒漠 Desert
4	2.0**	1.9**	/	/	/
5	3.8**	5.3**	3.6	3.3*	2.7
6	7.1**	6.9**	6.8*	6.8**	5.3
7	10.7*	11.7	10.3	10.9	9.6*
8	35.3	36.7	22.2*	37.8	21.9

* 表明 $P<0.05$, ** 表明 $P<0.01$;/表明该 IMF 不具有相应尺度的周期

由于大气与海洋环流的脉动和人类活动间接作用于陆地生态系统,导致植被活动可能存在周期性特征。各生态系统低频分量的平均周期(表 2)和显著性检验(图 3)表明,农田生态系统的 IMF 分量除了 IMF8 外,均通过了 5%显著性检验,可见农田生态系统的 NDVI 具有从年际到年代际的多重波动周期,但随着波动周期的增长,其显著性逐渐下降,农业生产对市场规律的适应和长周期的气候波动都可能是影响因素。森林生态系统 1.9a、5.3a 和 6.9a 的波动周期通过了 1%显著性检验,但长周期的年代际波动显著性很低,可能由于森林生态系统的群落环境相对比较优越,漫长的群落演替过程受气候波动影响较小。由于草地生态系统包含了北方

温带草地、青藏高原高寒草地及南方和东部次生草地,区域气候条件差异大,植被活动的气候波动痕迹不明显,该生态系统仅 6.8a 和 22.2a 的波动周期通过了 5% 的显著性检验。水体与湿地生态系统的植被活动更易受到气候波动的影响,主要表现出两个短周期的波动。荒漠生态系统的 NDVI 可能包含了大量非植被的背景信息,仅 9.6a 周期通过了 5% 显著性检验,可以认为荒漠生态系统的周期特性不具有明确的物理意义。上述分析表明,以上 5 类生态系统主要存在 1.9—7.6a 的年际波动周期特征和 9.6—11.7a、22.2a 的年代际波动周期特征;其中年际波动周期特征普遍比较显著,年代际波动周期特征显著性相对较差。由此推论,各生态系统植被活动的周期性变化可能与海洋和大气环流的脉动有一定联系。

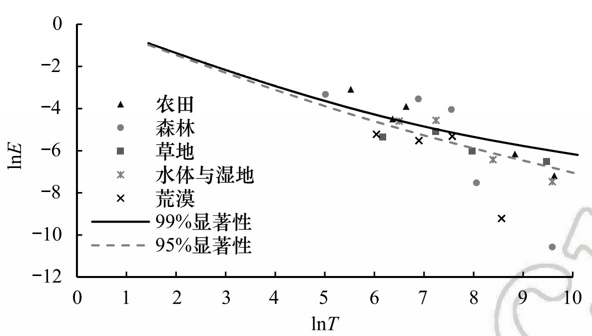


图 3 不同陆地生态系统低频分量显著性检验

Fig.3 Significance test of low frequency component of NDVI in different terrestrial ecosystems

E,能量密度 energy density;*T*,平均周期 averaged period

残差分量 RSE 反映 NDVI 序列的内在发展趋势,图 4 可以看出,近 30 年来,虽然农田、森林、草地和水体与湿地生态系统的 NDVI 呈总体上升趋势,荒漠生态系统的 NDVI 总体下降,但内在包含了"上升—下降"两个阶段,由之前的明显上升趋势转变为不同程度的下降趋势,这与传统线性趋势显然不同[18,20]。暖干化趋势下,尤其是生长季降水减少引起的干旱胁迫是植被活动发生转折的重要原因[38-39]。农田、森林、草地、水体与湿地和荒漠生态系统 NDVI 趋势转折的节点有所差异,主要集中在 20 世纪 90 年代和本世纪初,植被活动转折期的差异在相关文献[14, 38-39]有所印证,这可能是气候变化响应的差异和生态系统分类精度共同作用的结果。

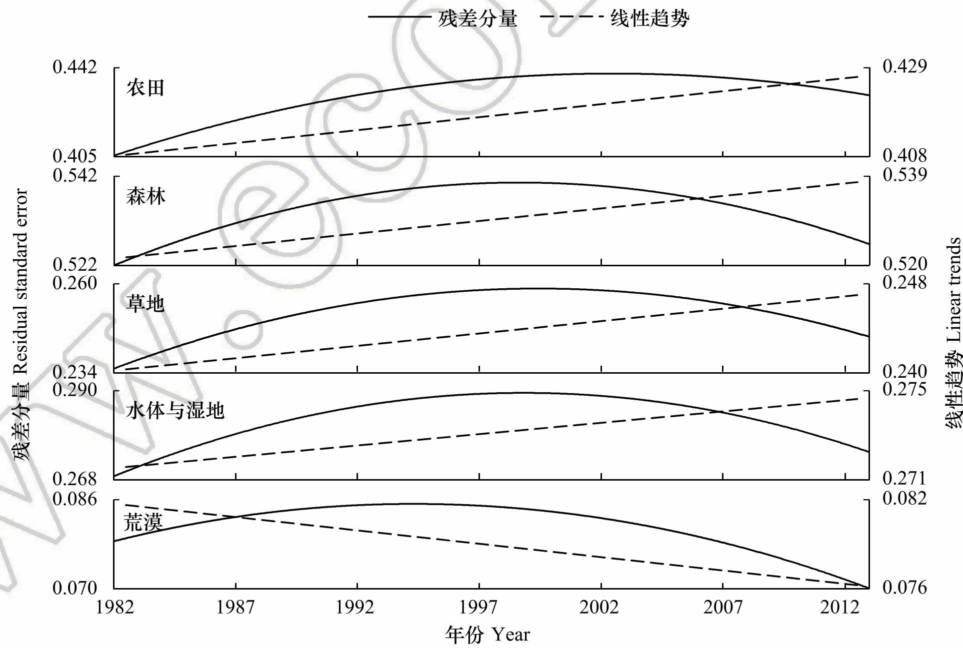


图 4 各陆地生态系统 NDVI 残差分量与线性趋势

Fig.4 Linear trends and residual standard error on NDVI of every terrestrial ecosystem

2.4 不同生态系统的 NDVI 空间异质特征分析

对于单一生态系统的 NDVI 图像,各像元 NDVI 之间的标准差越大,则表明该生态系统植被长势的空间异质性越强,植被活动的地域差异越大。从表 3 看出,各生态系统空间异质性也存在 2.1—7.1a 的年际波动周期

特征和 10.7a、30.2a 的年代际波动周期特征,但各生态系统空间异质性的年代际周期波动普遍不具有物理意义,主要表现为 2.1—7.1a 的年际周期节律,这可能反映了短周期气候波动对生态系统植被活动的影响。

表 3　1982—2012 年中国陆地生态系统 NDVI 标准差序列各分量的平均周期

Table 3　Mean period of each intrinsic mode function on spatial heterogeneity of Chinese different ecosystems during 1982—2012

本征模态函数 Intrinsic mode function	生态系统类型 Types of ecosystem				
	农田 Farmland	森林 Forest	草地 Grassland	水体与湿地 Water and wetland	荒漠 Desert
4	/	/	2.1**	2.1**	/
5	2.1	3.0	5.3**	4.3**	3.6**
6	5.3**	5.3**	7.1**	7.1**	5.3**
7	10.7	10.7**	10.7	10.7	11.9
8	16.7	29.8	32.3	21.9	30.2**

* 表明 $P<0.05$, ** 表明 $P<0.01$;/表明该 IMF 不具有相近尺度的周期

标准差序列的残差分量(RSE)表明(图 5),近 30 年中国各陆地生态系统植被长势的空间异质性总体增强,植被活动的区域差异越来越大。荒漠生态系统 NDVI 的空间异质性持续增强,直到本世纪后才逐渐减弱,这与亚洲沙漠边缘植被活动变化的趋势比较一致[40],沙漠边缘有效水分的变化直接影响到植被活动,进而反映到空间异质性的变化趋势。森林生态系统植被长势的空间异质性在 20 世纪 90 年代触底后持续增强,农田、草地和水体与湿地生态系统的空间异质性一直处于增强趋势,区域差异加大,Peng 等[38]指出,近 30 年中国南、北方的植被长势存在明显差异,暖干化趋势对中国北方植被长势的季节性抑制可能是中国陆地生态系统植被活动空间异质性增强的重要原因。

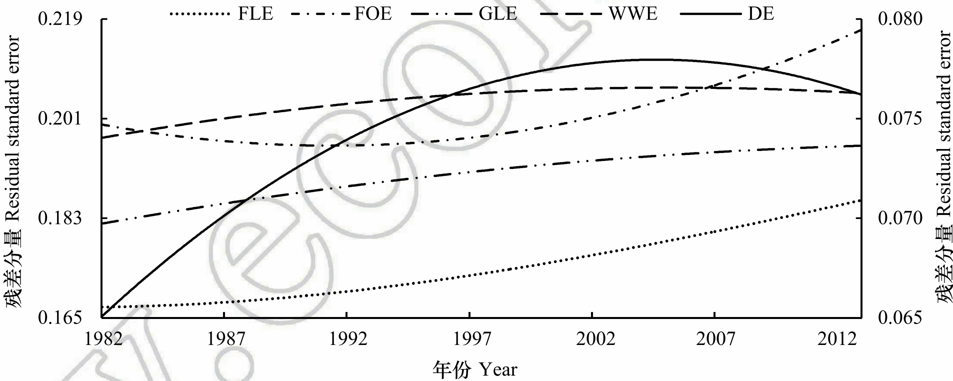


图 5　陆地生态系统 NDVI 标准差序列的残差分量

Fig.5　Linear trends and residual standard error on spatial heterogeneity of every terrestrial ecosystem

FLE, 农田生态系统 farmland ecosystem; FOE, 森林生态系统 forest ecosystem; GLE, 草地生态系统 grassland ecosystem; WWE, 水体与湿地生态系统 water and wetland ecosystem; DE, 荒漠生态系统 desert ecosystem. 图中右侧纵轴仅代表荒漠生态系统 DE,左侧纵轴代表其他 4 类生态系统

2.5　NDVI 变化周期与气候事件关系分析

前述分解的周期与 ENSO 事件 2—7a 的变化周期、太阳活动有关的黑子周期(11—12a)、海尔周期(22a)、准 35a 的布吕克纳周期在时间上存在某种契合,可能表明不同陆地生态系统植被活动与引起海洋和大气环流脉动的 ENSO 事件、太阳活动和海气相互作用等存在一定联系。Propastin[41]和 Nagai[42]等指出陆表植被活动与 ENSO 事件显著相关,Lü 等利用 GIMMS 数据研究发现中国各陆地生态系统有 32.34%的区域的植被对 ENSO 事件响应敏感[43]。本研究将 MEI 指数进行 EEMD 分解,并与各主要生态系统 NDVI 具有相近波动周期的 IMF 分量进行相关分析,发现 ENSO 事件存在 2.1a、5.3a 和 7.1a 的波动周期,生态系统 NDVI 的波动周期与 ENSO 事件存在不同程度的相关性(表 4)。农事生产通过有目的的水分调节适应农时,明显掩盖了自然气候

系统对农田生态系统的周期性影响,仅 IMF6 分量与 ENSO 事件的 7.1a 周期极显著相关;森林生态系统受人类活动干扰较少,IMF4、IMF5 和 IMF6 分量分别与 ENSO 事件的 2.1a、5.3a 和 7.1a 周期极显著相关,有着明显的气候短周期脉动痕迹;草地生态系统的周期性特征不明显,震荡周期与 ENSO 事件无关;水体与湿地生态系统的 IMF6 分量与 ENSO 事件 7.1a 周期极显著相关,湿地植被活动存在明显振荡周期;荒漠生态系统植被信息不足,波动周期与 ENSO 事件无显著相关性。

此外,太阳活动与全球气候变化关系密切[44],尽管太阳活动峰、谷值年的太阳总辐射变化极小,但施加大气系统的影响可以通过热带地区海-气耦合作用得到强化,Hadley/Walker 环流随着类 La Niña 事件的出现而减弱[45],这对东亚地区大气环流异常和中国南北地区反向降水变化影响显著[46],而降水、气温和辐射等气候变量则通过光合作用等生理过程影响植被的生长状况和群落演替。太阳活动 11a 周期与不同生态系统的 NDVI 变化存在不同程度的极显著负相关关系(表 4),这可能与太阳活动峰值年我国南方和东北夏季降水偏少有关,而生长季尤其是夏季降水对植被生长极为重要,显然植被活动 11a 左右的震荡周期含有明显的太阳活动信息。上述分析表明,气候系统的脉动会引起陆地生态系统的 NDVI 波动,海洋与大气环流的脉动与各生态系统植被活动的周期性节律有着一定关联,ENSO 事件和太阳活动是推动植被活动周期性振荡的因素之一。

表 4 各生态系统与 ENSO、太阳黑子相应周期分量相关分析

Table 4 Correlations of the Intrinsic Mode Function between NDVI of each ecosystem and ENSO and sunspot

气候事件 Climate events	周期 Periods/a	农田 Farmland	森林 Forest	草地 Grassland	水体与湿地 Water and wetland	荒漠 Desert
ENSO	2.1	-0.0888	-0.1634**	—	—	—
	5.3	—	-0.1306*	—	—	0.0167
	7.1	-0.3147**	-0.5455**	-0.0701	-0.2529**	—
太阳黑子 Sunspot	11	-0.2837**	-0.4439**	-0.4038**	-0.1761**	-0.3180**

ENSO,厄尔尼诺-南方涛动 El Niño-Southern Oscillation; * 显著相关(P<0.05), ** 极显著相关(P<0.01);—表明该生态系统不具有相近尺度的周期

3 结论

基于 1982—2012 年的 GIMMS NDVI3g 和中国陆地生态系统分布数据,利用一元线性回归、集合经验模态分解和相关分析等手段,研究了近 30 年中国各陆地生态系统 NDVI 的时空变化特征,初步分析了 NDVI 变化与气候事件的关系,研究取得如下几点结论:

(1)我国近 30 年来 NDVI 主要以上升为主,ANDVI 的上升幅度为 0.0029/10a(P<0.05),MNDVI 的上升幅度为 0.0076/10a(P<0.01)。植被活动显著增强的区域主要是分布在东部季风区的农田和森林生态系统,显著下降的区域主要是分布于西北的荒漠生态系统和东北森林区。

(2)从线性特征来看,尽管各 ANDVI 和 MNDVI 变化趋势的显著性有所差异,但农田、森林、草地和水体与湿地生态系统的 NDVI 总体呈现非稳定的上升趋势,上升过程中伴随着较大波动,荒漠生态系统的 NDVI 呈下降趋势,植被退化显著。

(3)5 类生态系统的植被活动主要存在 1.9—7.6a 的年际周期波动特征和 10.7a、22.2a 的年代际周期波动特征,其中 1.9—7.6a 的年际周期特征普遍比较显著,年代际周期的显著性相对较差。与线性趋势不同,各生态系统植被活动的残差趋势包含“上升—下降”两个阶段,并相继于 20 世纪 90 年代到本世纪初发生转折。

(4)近 30 年来,我国各生态系统植被活动的空间异质性存在 2.1—7.1a 的年际周期节律;随着 NDVI 的上升,农田、森林、草地和水体与湿地生态系统的 NDVI 空间异质性持续增强,生态系统内部植被活动的区域差异逐渐加大,荒漠生态系统植被活动的空间异质性增强的趋势于本世纪初后逐渐减弱。

(5)气候系统的脉动会引起陆地生态系统的 NDVI 波动,海洋与大气环流的短周期脉动与各生态系统植

被活动的周期性节律有一定关联,ENSO 事件和太阳活动可能是推动植被活动周期性振荡的因素之一。

太阳活动、地球轨道变化、造山运动和人类活动等都是影响地球气候变化的重要原因,而太阳活动和地球轨道变化表现的周期性节律可能是植被活动周期性振荡的重要来源。但太阳活动和地球轨道变化与气候系统的联系集中在相似周期的比较层面[47],其影响气候系统的物理机制并不十分明确。尽管本研究基于集合经验模态分解初步揭示了各生态系统植被活动的周期性振荡特征,丰富了植被活动响应气候变化的认识,但该方法计算的平均波动周期[29]与傅里叶谱密度的结果有所差异,且生态系统内部植被类型对气候变化的响应差异也对周期的显著性检验存在干扰,这对深入解释植被活动的周期特征带来困难。近 30 年来,中国大范围实施了退耕还林、还草等人工生态治理工程,同时还经历了快速的城市化,人为因素引起的土地利用类型转变也对各生态系统的植被活动有着深刻的影响。因此,在气候变化背景下剥离生态系统转换区域植被活动的变化,既有助于准确量化人为因素对植被活动的影响,也有利于解释气候变化影响植被活动的机制。

参考文献(References):

[1] 秦大河, 罗勇, 陈振林, 任贾文, 沈永平. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 311-314.

[2] 王涛. 干旱区主要陆表过程与人类活动和气候变化研究进展. 中国沙漠, 2007, 27(5): 711-718.

[3] Xu L, Myneni R B, Chapin III F S, Callaghan T V, Pinzon J E, Tucker C J, Zhu Z, Bi J, Ciais P, Tømmervik H, Euskirchen E S, Forbes B C, Piao S L, Anderson B T, Ganguly S, Nemani R R, Goetz S J, Beck P S A, Bunn A G, Cao C, Stroeve J C. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. Nature Climate Change, 2013, 3(6): 581-586.

[4] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.

[5] Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Reichstein M, Luyssaert S, Margolis H, Fang J Y, Barr A, Chen A P, Grelle A, Hollinger D Y, Laurila T, Lindroth A, Richardson A D, Vesala T. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. Nature, 2008, 451(7174): 49-52.

[6] 周广胜, 王玉辉, 白莉萍, 许振柱, 石瑞香, 周莉, 袁文平. 陆地生态系统与全球变化相互作用的研究进展. 气象学报, 2004, 62(5): 692-707.

[7] 田汉勤, 万师强, 马克平. 全球变化生态学: 全球变化与陆地生态系统. 植物生态学报, 2007, 31(2): 173-174.

[8] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003: 368-369.

[9] Wang X H, Piao S L, Ciais P, Li J S, Friedlingstein P, Koven C, Chen A P. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(4): 1240-1245.

[10] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, Los S O, Myneni R B, Taylor M G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. International Journal of Biometeorology, 2001, 45(4): 184-190.

[11] Cai B F, Yu R. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(6): 1170-1186.

[12] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature, 1997, 386(6626): 698-702.

[13] Piao S L, Wang X H, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. Global Change Biology, 2011, 17(10): 3228-3239.

[14] Park H S, Sohn B J. Recent trends in changes of vegetation over East Asia coupled with temperature and rainfall variations. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(D14): D14101.

[15] 杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 房世峰, 刘伟玲, 阴俊齐, 袁新杰, 徐延达, 舒俭民, 何萍. 三江源区近 30 年植被生长动态变化特征分析. 草业学报, 2016, 25(1): 1-12.

[16] 白建军, 白江涛, 王磊. 2000—2010 年陕北地区植被 NDVI 时空变化及其与区域气候的关系. 地理科学, 2014, 34(7): 882-888.

[17] Peng J, Liu Z H, Liu Y H, Wu J S, Han Y N. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent. Ecological Indicators, 2012, 14(1): 28-39.

[18] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342.

[19] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 马文红. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学(C 辑), 2003, 33(6): 554-565.

[20] 李飞, 曾源, 李晓松, 赵千钧, 吴炳方. 近 30 年中国陆地植被活动遥感监测. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(8): 1671-1678.

[21] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, Slayback D A, Pak E W, Mahoney R, Vermote E F, Saleous N E. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(20): 4485-4498.

[22] 杜加强, 舒俭民, 王跃辉, 李盈昌, 张林波, 郭杨. 青藏高原 MODIS NDVI 与 GIMMS NDVI 的对比. 应用生态学报, 2014, 25(2): 533-544.

[23] 於琍, 曹明奎, 陶波, 李克让, 董文杰, 刘洪滨, 刘长友. 基于潜在植被的中国陆地生态系统对气候变化的脆弱性定量评价. 植物生态学报, 2008, 32(3): 521-530.

[24] Pinzon J E, Tucker C J. A non-stationary 1981-2012 AVHRR $NDVI_{3g}$ time series. Remote Sensing, 2014, 6(8): 6929-6960.

[25] Zeng F W, Collatz G J, Pinzon J E, Ivanoff A. Evaluating and quantifying the climate-driven interannual variability in global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index (NDVI3g) at global scales. Remote Sensing, 2013, 5(8): 3918-3950.

[26] Wolter K, Timlin M S. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). International Journal of Climatology, 2011, 31(7): 1074-1087.

[27] 廖小罕, 施建成. 全球生态环境遥感监测 2013 年度报告. 北京: 中华人民共和国科学技术部国家遥感中心, 2014.

[28] Wu Z H, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004, 460(2046): 1597-1611.

[29] Huang N E, Shen S S P. Hilbert-Huang Transform and Its Applications. 2nd ed. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2014: 107-127.

[30] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.

[31] 何月, 樊高峰, 张小伟, 柳苗, 高大伟. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应. 生态学报, 2012, 32(14): 4352-4362.

[32] 王彧, 黄耀, 张稳, 于永强, 王平. 中国农业植被净初级生产力模拟(Ⅱ)——模型的验证与净初级生产力估算. 自然资源学报, 2006, 21(6): 916-925.

[33] 杜灵通, 宋乃平, 王磊, 侯静, 胡悦. 近 30 年气候变暖对宁夏植被的影响. 自然资源学报, 2015, 30(12): 2095-2106.

[34] 刘双娜, 周涛, 魏林艳, 舒阳. 中国森林植被的碳汇/源空间分布格局. 科学通报, 2012, 57(11): 943-950.

[35] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云. 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 2016, 61(2): 139-154.

[36] 牛振国, 张海英, 王显威, 姚文博, 周德民, 赵魁义, 赵惠, 李娜娜, 黄华兵, 李丛丛, 杨军, 柳彩霞, 刘爽, 王琳, 李展, 杨镇钟, 乔飞, 郑姚闽, 陈炎磊, 盛永伟, 高小红, 朱卫红, 王文卿, 王红, 翁永玲, 庄大方, 刘纪远, 罗志才, 程晓, 郭子琪, 宫鹏. 1978—2008 年中国湿地类型变化. 科学通报, 2012, 57(16): 1400-1411.

[37] 慈龙骏, 杨晓晖, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响. 地学前缘, 2002, 9(2): 287-294.

[38] Peng S S, Chen A P, Xu L, Cao C X, Fang J Y, Myneni R B, Pinzon J E, Tucker C J, Piao S L. Recent change of vegetation growth trend in China. Environmental Research Letters, 2011, 6(4): 044027.

[39] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. Science, 2010, 329(5994): 940-943.

[40] Jeong S J, Ho C H, Brown M E, Kug J S, Piao S L. Browning in desert boundaries in Asia in recent decades. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(D2): D02103.

[41] Propastin P, Fotso L, Kappas M. Assessment of vegetation vulnerability to ENSO warm events over Africa. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12 Suppl 1: S83-S89.

[42] Nagai S, Ichii K, Morimoto H. Interannual variations in vegetation activities and climate variability caused by ENSO in tropical rainforests. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(6): 1285-1297.

[43] Lü A, Zhu W, Jia S. Assessment of the sensitivity of vegetation to El-Niño/Southern Oscillation events over China. Advances in Space Research, 2012, 50(10): 1362-1373.

[44] Lockwood M. Solar-induced climate effects // Meyers R A, ed. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. New York: Springer, 2012: 9795-9810.

[45] Meehl G A, Arblaster J M. A lagged warm event-like response to peaks in solar forcing in the Pacific Region. Journal of Climate, 2009, 22(13): 3647-3660.

[46] 周群, 陈文. 太阳活动 11 年周期对 ENSO 事件海温异常演变和东亚降水的影响. 大气科学, 2012, 36(4): 851-862.

[47] 肖子牛, 钟琦, 尹志强, 周立旻, 宋燕, 韩延本, 黄聪, 潘静, 赵亮. 太阳活动年代际变化对现代气候影响的研究进展. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1335-1348.